



Universidad Politécnica de Madrid  
E.T.S.I. en Topografía, Geodesia y Cartografía

# Red GPS “ZFESNET” para el estudio de la evolución del ciclo sísmico de deformaciones y esfuerzos asociado a la Zona de Falla de El Salvador

A. Staller, J.J. Martínez-Díaz, B. Benito, D. Hernández, M. Díaz, C. Pullinger,  
C. DeMets, C. Canora, J. A. Álvarez-Gómez y M. Béjar



E.T.S. DE INGENIERÍA EN TOPOGRAFÍA  
GEODESIA Y CARTOGRAFÍA

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

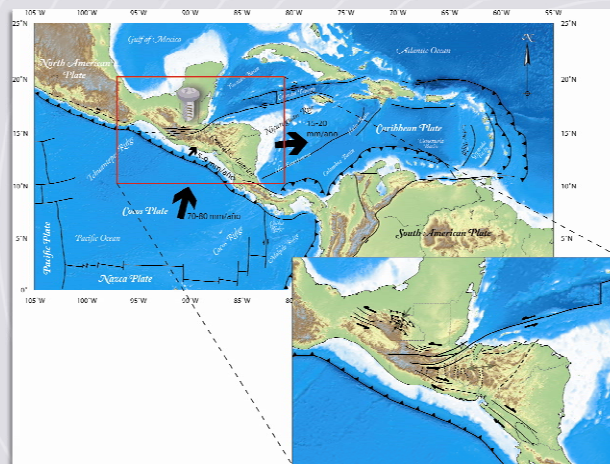
## Estructura de la presentación.

1. Marco Tectónico y Contexto Sísmico.
2. Zona de Falla de El Salvador (ZFES).
3. Proyecto ZFESNET (Objetivo y Fases).
4. Conclusiones.



## Marco Tectónico.

- ❑ La zona sismogénica de El Salvador se sitúa en el **segmento Cocos-Caribe de la zona de subducción centroamericana**, donde las placas convergen con velocidades de  $\sim 73-84$  mm/a (DeMets, 2001).



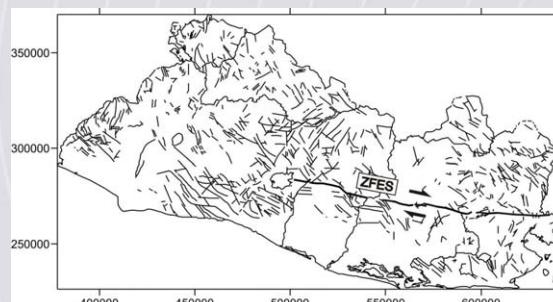
03/07/2008

3



## Marco Tectónico.

- ❑ El Salvador se caracteriza por la presencia de **fallas de desgarre sísmicamente activas subparalelas a la zona de subducción**.
- ❑ Responsables de la mayoría de **los terremotos destructivos** que han tenido lugar a lo largo de la **costa Pacífica en el arco volcánico centroamericano**, desde Guatemala hasta Costa Rica.
- ❑ Las **velocidades de movimiento paralelo al arco** que estiman modelos están en torno a  $\sim 12-13$  mm/a. (DeMets, 2001; Guzman-Speciale, 2001; Lyon Caen, 2006)



03/07/2008

Modificado de Bose et al., 1978

4



## Contexto Sísmico.

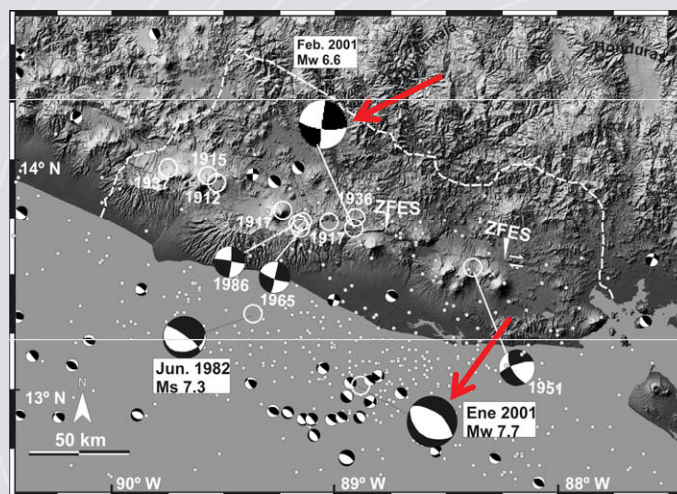
- ❑ El Salvador ha sufrido al menos **11 terremotos destructivos durante los últimos 100 años** causando más de 3000 muertes, debidas tanto al efecto directo de los seismos como de los deslizamientos inducidos.
- ❑ En esta zona se producen **dos tipos de sismicidad** en función de su **origen tectónico** y su **localización**:
  - ❑ Los **mayores terremotos con  $M_w > 6.5$**  se generan en la **zona de subducción** a lo largo del **límite de las placas Cocos y Caribe**. Estos terremotos se producen a **profundidades intermedias** (~200 kilómetros), generando **daños moderados** en el continente.
  - ❑ Los terremotos en la **zona continental** se producen a lo largo del **arco volcánico salvadoreño** con **magnitudes de hasta  $M_w 6.7$** . Estos eventos presentan **carácter superficial** lo que hace que, a pesar de su menor tamaño, sean **más destructivos** que los de la zona de subducción.

03/07/2008

5



## Contexto Sísmico.



Mapa de mecanismos focales de **terremotos históricos destructivos** ocurridos en El Salvador (círculos blancos) y epicentros instrumentales ( $M_s > 2.5$ , periodo 1977–2001) (puntos blancos).

03/07/2008

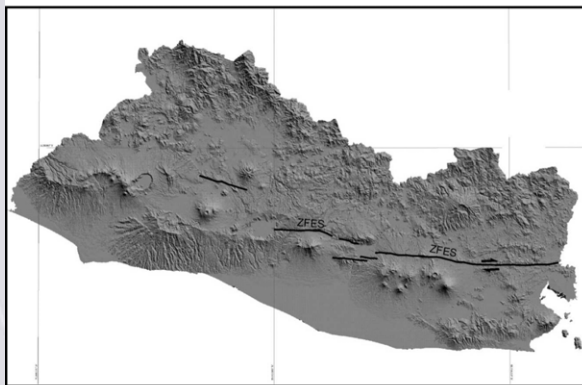
6





## Zona de Falla de El Salvador (ZFES)

- A partir de los terremotos del 2001 se identificó la **existencia de una falla activa** con movimiento de **desgarre dextral** y **longitud superior a 150 km** que atraviesa el país de este a oeste con una **dirección media N100°** y que sería la **responsable de la sismicidad destructiva de la zona volcánica**: la **Zona de Falla de El Salvador (ZFES)** (Martínez-Díaz et al., 2004).



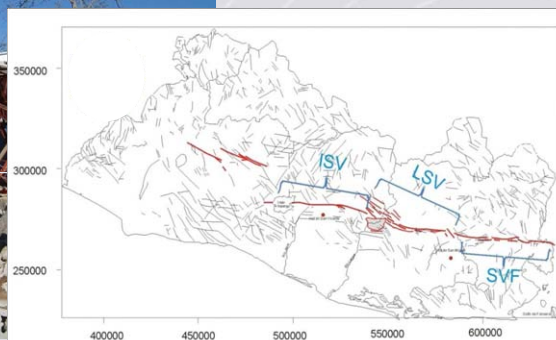
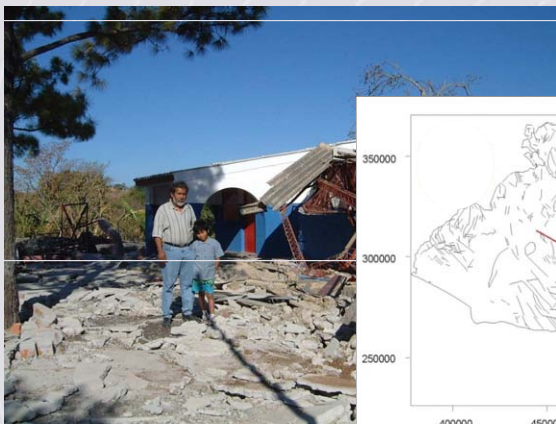
03/07/2008

7



## Zona de Falla de El Salvador (ZFES)

- El **segmento Ilopango-San Vicente** fue el responsable del **terremoto de febrero de 2001 (Mw 6.6)**.



03/07/2008

8





## Estudio de la Zona de Falla de El Salvador

ZFES es una de las **principales estructuras tectónicas** de la región y posiblemente la estructura donde se **está acomodando la mayor parte del movimiento paralelo** a la zona de subducción

### Determinación del Ciclo Sísmico de la ZFES

Escala temporal Geológica  
Estudios de Paleosismicidad



Escala temporal actual  
Estudios de deformación  
Técnicas Geodésicas



03/07/2008

9



## ZFES. Estudios de Paleosismicidad

- ❑ **OBJETIVO.** Caracterización de la actividad paleosísmica de la ZFES, mediante la aplicación de técnicas paleosísmicas.



03/07/2008

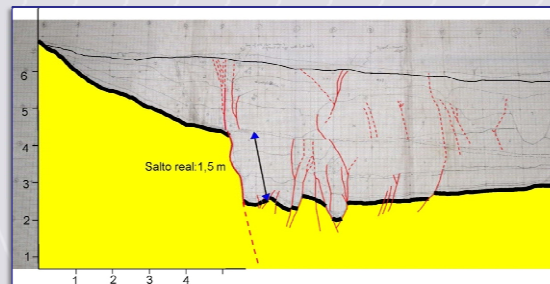
10



## ZFES. Estudios de Paleosismicidad

### ❑ RESULTADOS ALCANZADOS.

- ❑ Identificación del plano de falla de la ZFES.
- ❑ Confirmación de la cinemática de desgarre con componente normal.
- ❑ Estos estudios han permitido estimar una velocidad geológica de la falla de  $\approx 2 \text{ mm/a}$  e identificar varios eventos sísmicos de  $M_w > 6.5$  ocurridos en los últimos 1500 años.



03/07/2008

Velocidad media geológica  $> 2 \text{ mm/a}$

11



## ZFES. Estudios de deformación.

### PROYECTO ZFESNET

Determinación de deformaciones y esfuerzos acumulados a partir de datos GPS

Conocer la distribución de la deformación en la Zona

- sólo en la ZFES ¿?
- comportamiento en otros segmentos ¿?

Conocer el estado de la falla

- acoplamiento ¿?
- creeping ¿?

Complementar los datos geológicos existentes

- tasas de deslizamiento
- mejor entendimiento de los datos de sismicidad histórica y paleosismicidad

Contribuir a una correcta evaluación de la amenaza sísmica para esta zona

03/07/2008

12



## Proyecto ZFESNET.

- ❑ **Establecimiento de una Red GPS** para la determinación de deformaciones y esfuerzos acumulados en la ZFES, denominada **ZFESNET**.
- ❑ Proyecto financiado por la **Universidad Politécnica de Madrid** y desarrollado en colaboración con la **Universidad Complutense de Madrid**, el **Servicio Nacional de Estudios Territoriales (SNET)** de El Salvador, y la **Universidad Wisconsin-Madison** de EE.UU.
- ❑ El proyecto pretende ser una fuente que **genere un elevado volumen de datos geodésicos** en el futuro próximo que puedan ser **utilizados para la elaboración de modelos** que ayuden a una determinación precisa del campo de **deformaciones de la corteza** en la zonal entorno de la ZFES.

03/07/2008

13



## Proyecto ZFESNET.

- ❑ **Objetivos específicos:**
  1. **Diseñar y establecer una red GPS** con el fin de realizar una cuantificación y monitorización de las deformaciones intersísmicas, y en su caso cosísmicas, asociadas a la actividad de la ZFES.
  2. **Realizar una primera campaña de observación GPS** (oct-nov 2007), que estableciera el marco de referencia para la determinación de deformaciones.
  3. **Continuar realizando campañas de observación GPS** (mínimo una campaña cada 2 años). Próxima campaña programada para oct-nov 2008, lo cual permitirá obtener un campo de deformaciones preliminar.

03/07/2008

14





## Proyecto ZFESNET. Fases.

1. Diseño de la Red GPS ZFESNET.
2. Establecimiento de la ZFESNET. Diseño definitivo.
3. Campaña de observación GPS ZFESNET 2007.
4. Proceso de datos campaña ZFESNET 2007. Obtención de resultados iniciales.
5. Actividades programadas.

03/07/2008

15



## Diseño de la Red GPS ZFESNET.

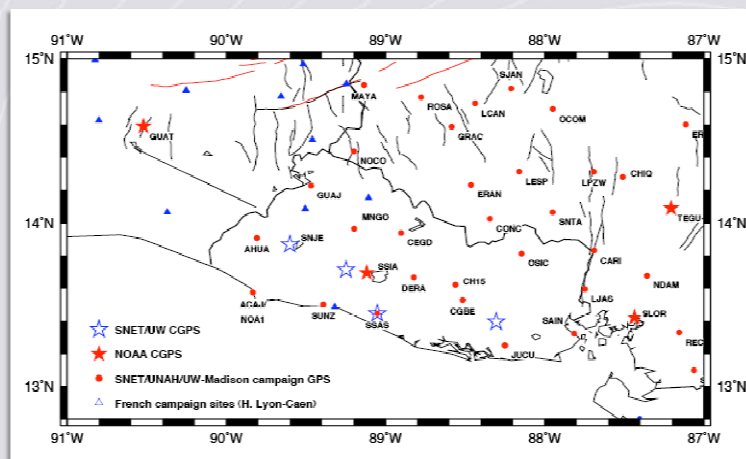
- ☐ **Definición de la posición inicial teórica** de las estaciones que van formar la ZFESNET.
- ☐ Para el diseño espacial de ZFESNET se ha llevado a cabo una **cartografía de las fallas activas de la zona** y se ha considerado especialmente la geometría de la zona de desplazamiento principal de la ZFES.
- ☐ ZFESNET ha sido diseñada de forma que pueda estar **coordinada con la red regional ya existente** en la zona gestionada por el **SNET** y la **Univ. de Wisconsin-Madison** de modo que los datos obtenidos puedan ser incluidos en los modelos geodinámicos regionales centroamericanos.

03/07/2008

16



## Diseño de la Red GPS ZFESNET.



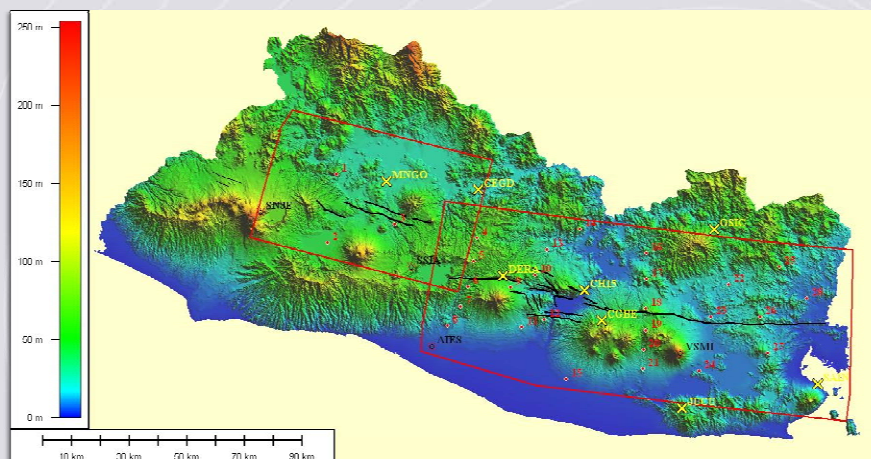
Redes y estaciones GPS existentes en El Salvador, Guatemala y Honduras. Noviembre 2006.

03/07/2008

17



## Diseño de la Red GPS ZFESNET.



Prediseño de la ZFESNET, teniendo en cuenta los criterios establecidos. Total 36 estaciones, 8 pertenecientes a redes existentes (en amarillo) y 28 nuevas estaciones (en rojo). 4 estaciones GPS permanentes (en negro).

03/07/2008

18



## Establecimiento de la ZFESNET. Diseño definitivo.

- ☐ Establecimiento definitivo de la posición de las estaciones GPS. ZFESNET, fue establecida con éxito en noviembre de 2007.
- ☐ Fases:
  - ☐ **Reconocimiento de la ZFES. Localización de estaciones GPS** en lugares seguros y estables, siguiendo el Pre-diseño y cumpliendo con los criterios establecidos.
  - ☐ **Señalización de las estaciones GPS con clavo de acero inoxidable** de 10 cm de longitud, colocados directamente sobre roca o elemento físico natural con la menor susceptibilidad posible a sufrir movimientos propios asociados a deslizamientos gravitacionales, asentamientos o cambios de volumen de origen térmico.

03/07/2008

19



## Establecimiento de la ZFESNET. Diseño definitivo.



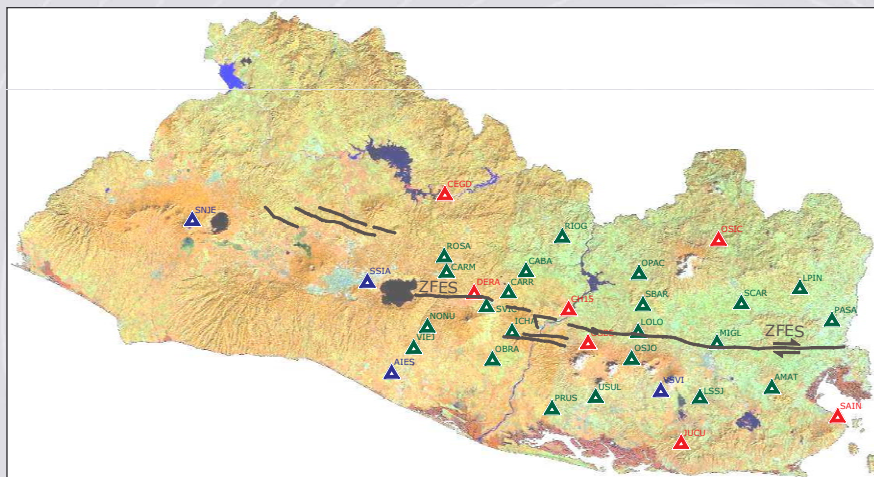
03/07/2008

20





## Establecimiento de la ZFESNET. Diseño definitivo.



Diseño definitivo de la ZFESNET. 29 estaciones en total, 7 pertenecientes a redes existentes (en rojo), 22 nuevas (en verde). 4 estaciones GPS permanentes (en azul).

03/07/2008

21



## Campaña de observación GPS ZFESNET 2007.

- ☐ La **Campaña ZFESNET-2007** fue llevada a cabo del 21 de octubre al 21 de noviembre de 2007.
- ☐ Previo a la observación se ha realizado la comprobación del instrumental utilizado siguiendo los procedimientos descritos por UNAVCO.
- ☐ Observación con **4 receptores geodésicos bifrecuencia** de alta precisión Trimble modelo 5700 con antena Geodésica modelo ZEPHYR Geodetic.
- ☐ Método de observación **estático-relativo**.
- ☐ Se han utilizado **dos tipos de estacionamiento** de las antenas GPS sobre los clavos que materializan las estaciones GPS:
  - ☐ trípode con bascula nivelante y plomada óptica.
  - ☐ sistema centrador para estacionamiento de la antena GPS sobre clavo sobre el suelo.
- ☐ **Sesiones** diarias de un **mínimo 20 horas**.
- ☐ Para la vigilancia y seguridad de los equipos durante la observación se contó con el apoyo de las Fuerzas Armadas Salvadoreñas.

03/07/2008

22



## Campaña de observación GPS ZFESNET 2007.



03/07/2008

23



## Proceso de datos campaña ZFESNET 2007. Obtención de resultados iniciales.

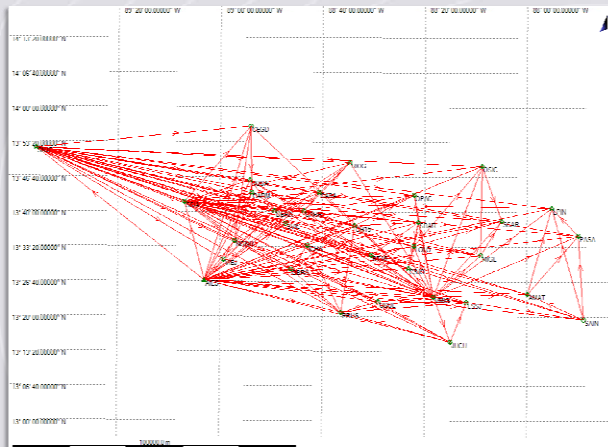
- ☐ Determinación de coordenadas iniciales de las estaciones GPS.
- ☐ Definición de un **marco de referencia (época 0)** para la determinación de deformaciones y desplazamientos en la zona de estudio.
- ☐ Proceso de datos realizado con **Bernerse versión 5.0** (desarrollado por la Universidad de Berna) y otros software comerciales.
- ☐ Cálculo realizado en **ITRF2000** (época de observación 2007.8).
- ☐ Se han utilizado las observaciones de la campaña del 2007, efemérides precisas y observaciones de las estaciones permanentes pertenecientes a IGS y a la red de vigilancia perteneciente al SNET y a la Universidad de Wisconsin-Madison.

03/07/2008

24



## Proceso de datos campaña ZFESNET 2007. Obtención de resultados iniciales.



Líneas base calculadas en la campaña ZFESNET-2007

03/07/2008

25



## Actividades programadas.

- ☐ Una **próxima campaña** se llevará a cabo en **octubre-noviembre** del año **2008**.
- ☐ Los resultados obtenidos permitirán obtener una **estimación preliminar de la deformación** y, por tanto, validar las velocidades de deformación esperadas y empezar a interpretar los resultados.
- ☐ En próximas campañas se espera:
  - ☐ **Mejorar y homogeneizar el sistema de estacionamiento** empleado.
  - ☐ **Densificar la Red GPS en la ZFES** donde sea necesario.
  - ☐ **Ampliar la red a la zona oeste del país**, para estudiar la transmisión de deformaciones y esfuerzos hacia el oeste.

03/07/2008

26





## Conclusiones.

- ❑ El **Proyecto ZFESNET**, iniciado en 2007, ha permitido:
  - ❑ **Diseñar e implantar una Red de Control de las deformaciones en la Zona de Falla de El Salvador**, actualmente la zona sismogénica con mayor capacidad para generar terremotos de magnitud superior a 6.5 de la cadena volcánica de El Salvador, zona además caracterizada por una muy elevada vulnerabilidad.
  - ❑ **Realizar una primera campaña GPS ZFESNET-2007**, punto de partida para campañas sucesivas.
  - ❑ Obtener un **marco de referencia** inicial, que sirva de referencia para las siguientes campañas.
  - ❑ **Introducir la técnica GPS** en el estudio de la deformación de la corteza terrestre, para su contribución en una mejor determinación del riesgo sísmico en el país.
  - ❑ **Apoyar las labores de investigación** que se han y se están desarrollando en El Salvador en relación con el riesgo sísmico.

03/07/2008

27



## Conclusiones.

- ❑ Los resultados futuros obtenidos a partir de este ZFESNET permitirán:
  - ❑ Comprender y cuantificar la **evolución del ciclo sísmico** asociado a esta fuente sismogénica de gran importancia.
  - ❑ **Determinar la velocidad de acumulación de la deformación intersísmica** y con ella la estimación de la **acumulación de esfuerzos de cizalla** a lo largo de los distintos segmentos que conforman la falla.
  - ❑ La interpretación de los resultados futuros ayudarán a **completar los datos existentes** y a **garantizar la elaboración de diagnóstico de riesgo**.

03/07/2008

28



E.T.S. DE INGENIERÍA EN TOPOGRAFÍA  
GEODESIA Y CARTOGRAFÍA

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

**Gracias por su atención**



03/07/2008

29